

三城目安山岩の一軸圧縮荷重下および周圧下におけるクリープ実験*

——岩石の破壊および変形における時間依存性の研究(第2報)——

山口 勉¹ 大久保 誠 介²
西 松 裕 一³ 小 泉 昇 三⁴

1. 緒 言

鉱山あるいは土木現場において、時間が重要な要因とされる現象には、坑道における上下盤接近、地表沈下、山はね、鉄柱の長期安定性、隧道における天盤の崩落等が挙げられる。これらのうち、特に破壊に関するものは、人命および構造物に重大な損害を与える場合が多い。岩石のクリープ特性はこれらの現象と重要な関連があると考えられ、実際の岩盤は多くの場合三軸圧縮状態にあるから、三軸圧縮状態での岩石のクリープ特性を明らかにすることが大切である。しかし、周圧下でのクリープに関する研究は実験が困難なこともあつて、ほとんど報告されていない。著者らは、主として三城目安山岩を対象として、時間に依存する挙動の系統的な研究を行なっている。第1報¹⁾では、周圧下における定ひずみ速度の試験について報告し、ひずみ速度が増加すると圧縮強度が顕著に増加することを明らかにした。本報では、周圧下でのクリープ実験を行ない、これを一軸圧縮荷重下のクリープと対比したので報告する。

2. 従 来 の 研 究

従来、一軸圧縮荷重下におけるクリープ実験については、数多くの研究・報告がなされている。これらの研究・報告の対象となつた岩石試料の種類は様々であるが、それらの遷移クリープに対する実験式は大別すると次の二つのグループに分類できる。第1のグループは、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が A_1, A_2 を定数として、指数則(exponential law),すなわち、

$$\dot{\epsilon} = A_1 \exp(-A_2 t) \quad \dots\dots\dots (a)$$

で表わせるグループであり、Baar²⁾による石灰岩、平松ら³⁾による砂岩の例が報告されている。第2のグループは、 A_3, A_4 を定数として、べき乗則(power law),すなわち、

$$\dot{\epsilon} = A_3 t^{A_4} \quad \dots\dots\dots (b)$$

に従うグループであり、Singh⁴⁾による石灰岩、Höfer⁵⁾

による岩盤の例が報告されている。特に(b)式において、定数 A_4 が-1の場合には、対数クリープ則(logarithmic creep law)と呼ばれる。これらのクリープ則に関する式では、いずれの式においてもひずみ速度は時間の経過とともに減少する。これに対して、ひずみ速度が時間とともに増加する区間、いわゆる三次クリープの開始点について、Kranzら⁶⁾は、応力レベルにかかわらず、非弾性体積ひずみがある一定の値になると、三次クリープが開始すると述べている。またCruden⁷⁾は、三次クリープの開始時刻とクリープ応力との間の関係式を実験的に見出している。

このように、一軸圧縮荷重下におけるクリープ実験については、数多くの研究があるが、周圧下における岩石のクリープに関する研究・報告がなされるようになったのは極めて最近であり、Cogan⁸⁾あるいは小林ら⁹⁾の研究があるものの、周圧下の岩石のクリープ変形挙動については、ほとんど解明されていない。

3. 実 験 結 果

実験装置は、第1報で示した装置とほぼ同様であるが、周圧下のクリープ実験に用いるための重要な特徴をあらためて述べると次のとおりである。

(1) 周圧ベッセルとしてBredthauer型を用い、プランジャがベッセル内に押し込まれる際の周圧増加を防止してある。

(2) 圧力変換器で測定した周圧をフィードバック信号として、油圧モータの電源をON-OFF制御した。この結果実験中の周圧は、予め設定された値と比較して、 $\pm 0.5 \text{ kg/cm}^2$ の範囲内に維持することができた。ただし、試験片の破壊寸前に、試験片が著しく膨張した場合には、周圧が 10 kg/cm^2 程度増加した例もあつた。

(3) 軸方向の載荷装置としては、サーボ制御式試験機を用い、周圧ベッセル内部のロードセルに加わる荷重が一定となるような制御を行なつた。

(4) 試験片の変形量を求めるため、プランジャとベッセルの相対変位量を、一組のクリップ型開口変位計により測定した。こうして測定された変形量には、目的とする試験片自体の変形量の外に、プランジャ、ロードセル等の変形量も含まれている。しかしながら、クリープ試験では、試

* 1982年9月28日受理 昭和56年度日本鉱業会春季大会にて一部発表

1. 正会員 工博 公害資源研究所資源第4部第2課
2. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科
3. 正会員 工博 東京大学教授 工学部資源開発工学科
4. 正会員 東京大学助手 工学部資源開発工学科

試験片の変形量以外は一定であり、したがって、計測された変形量の変化分は、試験片のクリープ変形と等しい。

(5) クリープ変位は、記録紙の時間送り型レコーダ、いわゆる t - Y レコーダを用いて記録した。この t - Y レコーダでの読み取り精度は、長さ 50 mm の試験片のひずみに換算して、 1×10^{-6} である。

4. 実験方法

一軸圧縮荷重下および周圧下におけるクリープ試験方法は、次の手順によつた。

(1) 岩石試料としては、三城目安山岩を用いた。この試験片は、第1報で使用された試験片と同一のブロックから採取したものである。試験片の直径は、約 25 mm、高さは約 50 mm である。これらの試験片は水を使用して端面間の平行度を 3/100 mm 以内になるように整形した後、2 日間の炉乾燥 ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) を行ない、さらにシリカゲルを入れたデシケータ内で 30 日間以上乾燥した。

(2) 試験片をデシケータ内から取り出した後、一組の金属製エンドピースで試験片を挟み、これら全体を熱可縮性チューブを用いて密閉した。さらに金属製エンドピースと熱可縮性チューブとの間に、シアノアクリレート系接着剤とエポキシ系接着剤とを併用して接着を行ない、密閉の効果を高めた。なお、一軸圧縮荷重下のクリープ実験においても、上述の方法で試験片を密閉し、周圧ベッセル内で実験を行なつたが、この主な理由は、クリープ実験では一般に、実験が長期間にわたるために、その間に空気中の湿分が試験片内に浸入することを防ぐためである。

(3) クリープ実験を開始する際に、所定の応力（以下、クリープ応力と呼ぶ）に達するまで、ほぼ一定の応力速度 $44 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ で载荷した。なお、クリープに関する以降の解析においては、試験片に加えられる応力が、クリープ応力に達した瞬間をもつて時刻 0 とすることにした。

(4) 周圧下におけるクリープ実験では、試験片に加える周圧を、 50 kg/cm^2 、 104 kg/cm^2 、 208 kg/cm^2 の 3 種

類とした。

5. 実験結果の整理方法

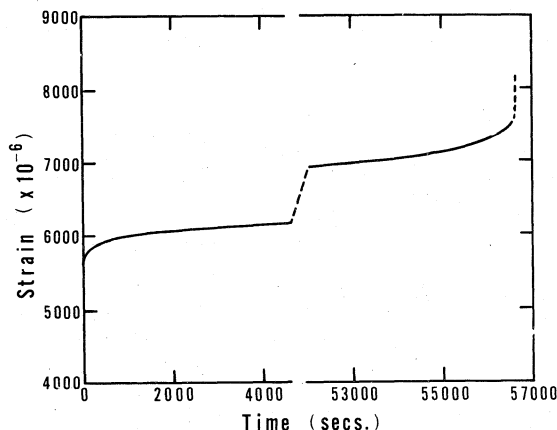
5.1 クリープ応力レベル

周圧下のクリープ実験では、クリープ応力は全て周圧との差応力で表わすことにする。また、試験片の応力状態が、どの程度破壊に近いかをあらわすため、クリープ応力レベル、すなわち、クリープ応力の基準強度 S_n に対する割合を用いることにした。ここでいう、基準強度 S_n とは、ひずみ速度 $1 \times 10^{-6}/\text{sec}$ で定ひずみ速度試験をしたときの平均破壊強度である。

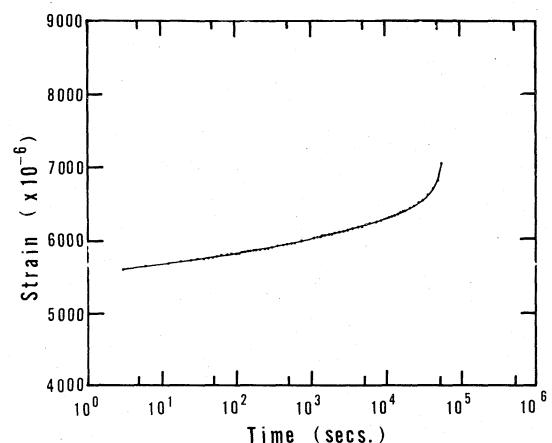
5.2 クリープ曲線の表記法

第1図では、一軸圧縮荷重下における代表的なクリープ曲線を横軸に時間、縦軸にひずみをとつて示した。この試験片で設定した応力のレベルは S_n の 90.2% である。これに対して第2図では、第1図と同一のデータを横軸に時間の対数、縦軸にひずみをとつて示した。この第1図と第2図とを比較すると、横軸に時間の対数をとつた後者のグラフでは、载荷直後のひずみ変化が急激に起こる段階から、破断直前までのクリープ変形を良く観察できる。また、同一の周圧下、同一の応力レベルであつても、試験片の破壊寿命は著しくばらつくのが普通であるので、一枚のグラフ上に複数のクリープ曲線を描く場合には、横軸に時間の対数をとつたグラフは都合が良い。そこで本報においては、クリープ曲線を、横軸に時間の対数をとつたグラフ上に整理し、また、このグラフを $\log t - \epsilon$ グラフと呼ぶことにした。

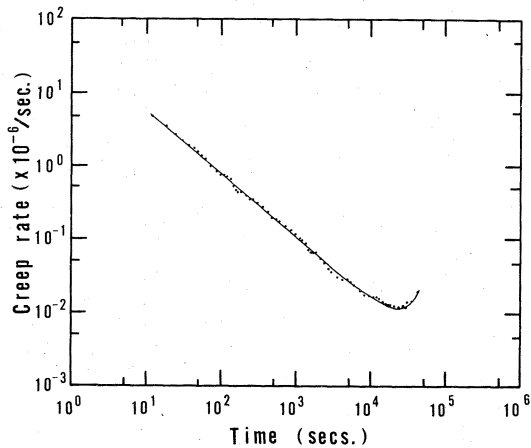
一方、ひずみ速度が時間とともに、どのように変化するかもまた、興味深い。本実験では、クリープ曲線を一旦、 t - Y レコーダに記録した後、記録紙上のクリープ曲線から、適当な時間間隔でひずみを読み取つた。この時間間隔は、時刻 1,000 分までは、 $\log t - \epsilon$ グラフの対数時間軸上でほぼ等間隔となるように、また時刻 1,000 分以降では、200 分毎とした。これらのデータから時刻 t におけるひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を計算する場合には、その前後 2 点のデータを加



第1図 クリープ曲線



第2図 横軸と対数としたクリープ曲線



第3図 クリープひずみ速度曲線

え、計5個のデータに対して、次式

$$\dot{\epsilon} = a + b \ln t \quad \dots\dots\dots (1)$$

をあてはめ、最小自乗法によつて a , b を求めた後、次式により $\dot{\epsilon}$ を計算した。

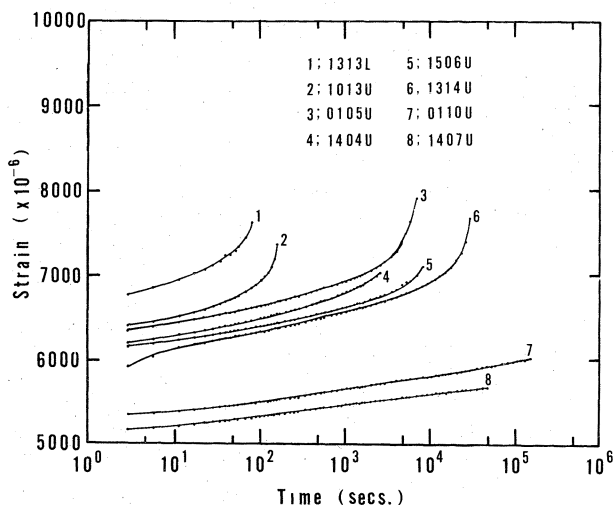
$$\dot{\epsilon} = b/t \quad \dots\dots\dots (2)$$

第2図で示したクリープ曲線に対し、上述の方法でひずみ速度を計算した結果を、第3図の $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフに示した。

6. 実験結果

一軸圧縮荷重下および周圧下でのクリープ実験における各試験片の実験条件を第1表にまとめた。第1表中、時間の欄で*印を付したものはその時刻で破壊が起きたことを示し、その他の試験片では、その時刻で除荷を行なつて実験を終了したものである。第1表から明らかなように、一軸圧縮クリープ実験は、6種類のクリープ応力レベルで行ない、また、周圧下のクリープ実験は、おのおの4種類のクリープ応力レベルで行なつた。

6・1 一軸圧縮荷重下でのクリープ実験

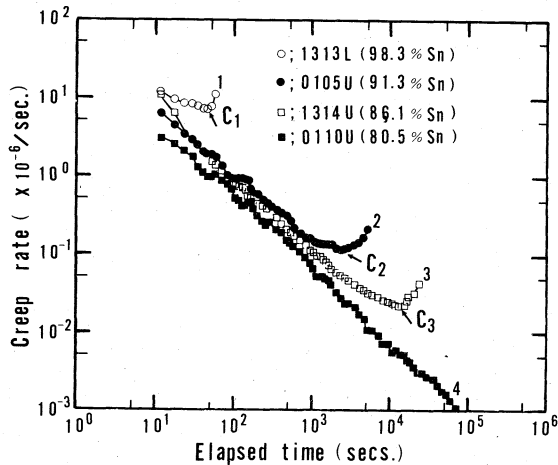


第4図 一軸圧縮荷重下におけるクリープ曲線

第4図は、一軸圧縮荷重下における代表的なクリープ曲線を $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフ上に示したものである。第4図中、7および8の番号を付したクリープ曲線は、除荷時までには破壊の起きなかつた試験片のクリープ曲線であり、両者は、この $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフ上で、ほぼ直線と見なすことができ

第1表 実験条件

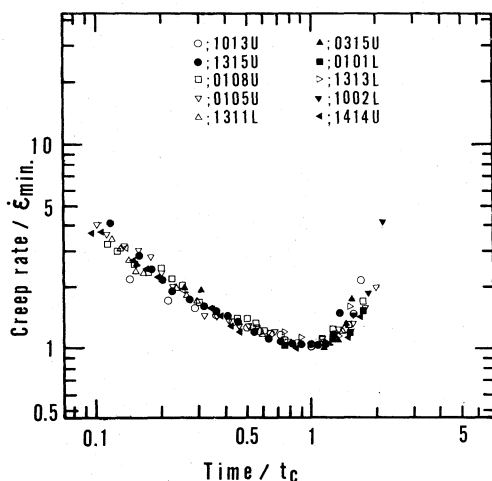
SAMPLE NO.	CONFINING PRESSURE (kg/cm ²)	NORMALIZED STRENGTH (kg/cm ²)	STRESS LEVEL (%Sc)	TIME (secs.)
0308U 1414U	0.0	985	75.8	77760
			76.3	65340*
0110U 1315U			80.5	160080
			80.6	25800*
1407U 0406L			80.9	70980
			81.1	93960*
1506U 1004L			85.9	8736*
			86.1	46920*
1314U			86.1	30600*
0108U 0715L			90.2	56700*
			90.6	12000*
0406U 1404U			90.7	248*
			90.9	4020*
0105U 0507U			91.3	7368*
			91.9	511*
1311L 0301L			94.8	16800*
			94.8	72000
1106L			96.1	2400*
1013U 1002L	50.0	1272	97.4	174*
			97.8	54*
0315U 0101L			97.8	256*
			98.0	57*
1313L			98.3	91*
0610L 1407L			79.8	90720
			80.1	73140
0808U			80.3	80760
1214L 0803L			84.4	86820
			84.7	81780
1008U			85.1	85080
0615U 0115L			89.2	86700
			89.4	76620
0709L			89.8	108600
L1504 L0205			98.4	2100*
			99.6	1080*
0115U 0204L	104.0	1559	79.0	86400
			79.0	86640
1105U			79.2	82080
0111L 0602L			83.5	86100
			84.0	86400
0309L			84.7	33120
0410U 1310L			87.9	87480
			88.0	61380
0905L			88.5	97080
1302L 1111U			97.9	27000
			98.2	24000*
1001U 0609L			98.2	14400
			98.7	60000
1081L			98.8	96000*
1503U 1402U	208.0	1980	78.6	79020
			79.1	85680
1512U			79.3	84120
0203L 0708U			83.9	72000
			83.8	86580
1411L			84.4	87060
0110L 1506L			88.8	85440
			89.0	63840
0912U			89.2	92940
0502U 0715U			98.3	84000
			98.5	96000
0510L			98.7	120000



第5図 一軸圧縮荷重下におけるひずみ速度曲線

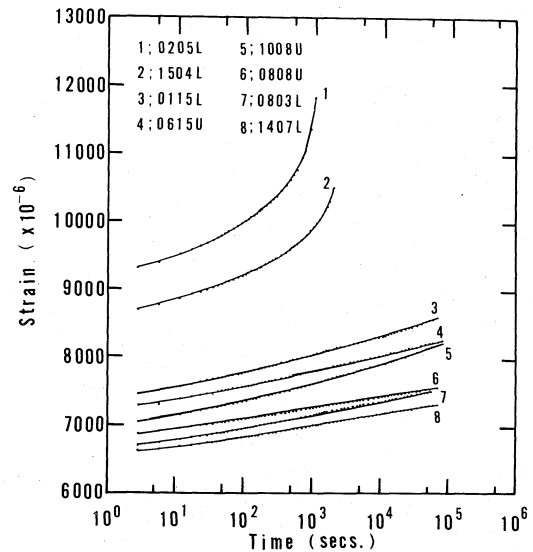
対数クリープ則に従っている。

次に、第5図では、第4図で示したクリープ曲線から代表的な例を選んで、ひずみ速度を計算し、 $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフ上にプロットしたものである。この第5図から明らかなように、 $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフ上で、ひずみ速度は初期の間、ほぼ直線的に減少し（減速クリープ区間）、最小となつた後、再びひずみ速度が増加して（加速クリープ区間）、その後、破壊に至る。この第5図において注目すべきことは、試験片のひずみ速度曲線相互で、ひずみ速度が最小値 $\dot{\epsilon}_{\min}$ をとる点、すなわちC点付近の形状を比較した場合、おのおのが非常に良く似た傾向を示すことである。そこで、この $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフ上で破壊の起きた試験片のひずみ速度曲線を、おのおののC点が一致するように平行移動させた図を第6図に示した。この第6図から明らかなように、おのおのの試験片のひずみ速度曲線は試験片破壊寿命の長短にかかわらず、ほぼ正確に重なり合っている。したがって、



第6図 一軸圧縮荷重下におけるひずみ速度曲線 (t_c は、各ひずみ速度曲線で、ひずみ速度が最小になる時刻であり、 $\dot{\epsilon}_{\min}$ は、最小のひずみ速度である)

a) 両対数グラフ上で、各曲線を平行移動することは、各曲線の時刻およびひずみ速度を、それぞれ一定の換算定数 t_c と $\dot{\epsilon}_{\min}$ で割ることに相当する。



第7図 周圧 50 kg/cm² におけるクリープ曲線

各ひずみ速度曲線において、ひずみ速度が最小になる時刻を t_c 、破壊の起きた時刻を t_f とし、 α を次式で定義すれば、

$$\alpha = t_f / t_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

おのおののひずみ速度曲線はC点付近ではほぼ同一の形状を持つので、 α の値もほぼ同一であることが予想される。そこで、実際に、破壊の起きた試験片群で α の値を計算すると、その平均値は、約2となることがわかった。

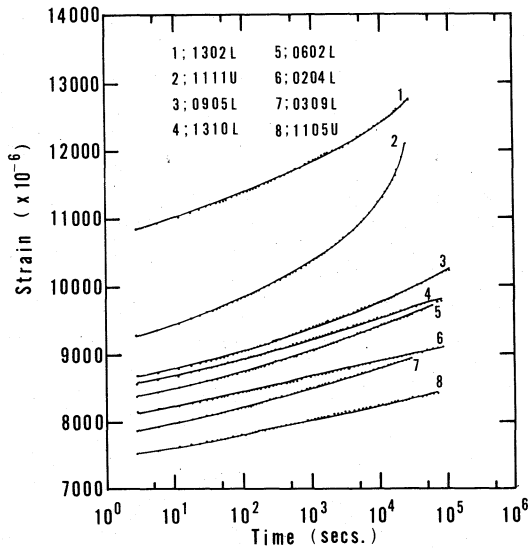
6.2 周圧下でのクリープ実験

第7図は、周圧 50 kg/cm² でのグリープ曲線を $\log t - \epsilon$ グラフ上に示したものである。この第7図からわかるように、図中、番号3から8までで示した破壊の起きなかつた試験片群では、ほぼ直線的にひずみが増加しており、クリープ挙動は対数クリープ則に従っている。これに対して、番号1および2を付した、破壊の起きた試験片のクリープ曲線は、全体として下に凸の滑らかな曲線となっており、既に述べた一軸圧縮荷重下のクリープ曲線と同様の傾向を示している。

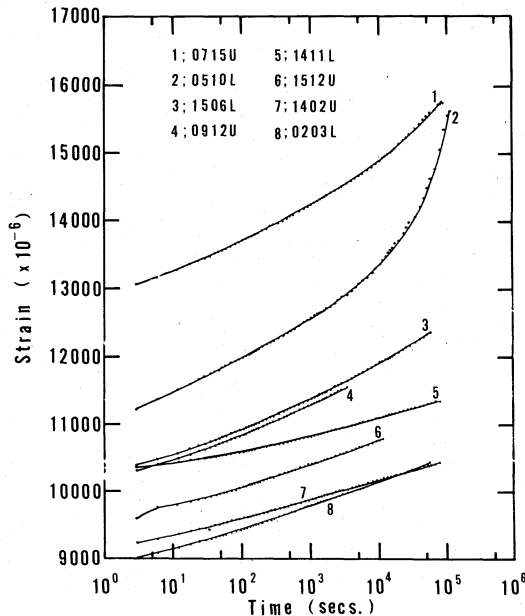
次に、第8図および第9図に、それぞれ周圧 104 および 208 kg/cm² でのクリープ曲線を示したが、いずれの場合も、周圧 50 kg/cm² と同様の傾向が見られる。

これらの実験結果を比較して、まず、周圧を一定に保つた場合、クリープ応力レベルの違いによつて、ひずみ速度にどのような差異が表われるかを検討する。第7図で示した周圧 50 kg/cm² のクリープ曲線の中から代表例を選んで、ひずみ速度を計算し、これらを第10図の $\log t - \dot{\epsilon}$ グラフ上にプロットした。この第10図から明らかなように、一般に応力レベルの高い試験片のひずみ速度曲線ほど、グラフ内で上方に位置している。したがって、載荷開始時から、同一の経過時間で比較すると、一般に応力レベルが高いほど、ひずみ速度が大きいといえる。なお、今回の実験の範囲内では、他の周圧下でも同様の傾向が示された。

他方、クリープ応力レベルを一定に保つた場合では、周



第8図 周圧 104 kg/cm² におけるクリープ曲線

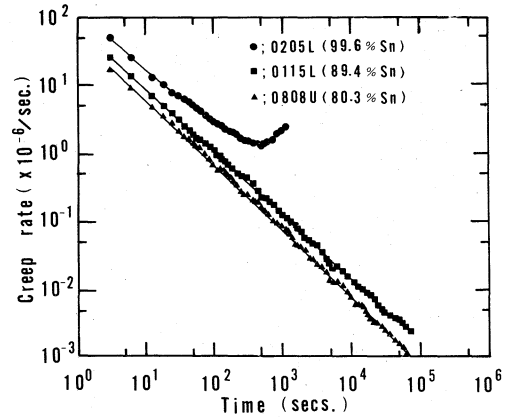


第9図 周圧 208 kg/cm² におけるクリープ曲線

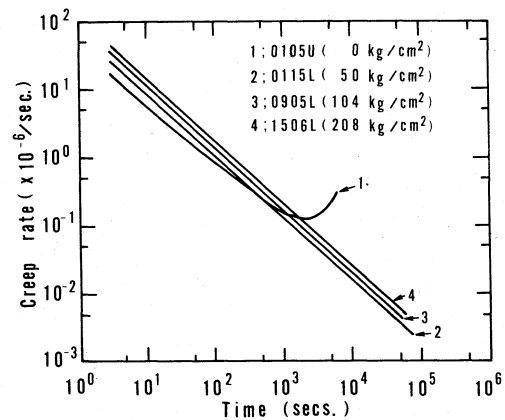
圧の違いにより、ひずみ速度にどのような差異が生ずるかも興味深い問題である。第11図では、4種類の周圧下におけるクリープ実験から、応力レベルが S_n のほぼ90%である代表例を選んでプロットした。ただし、これらの曲線は視察によるスムージングを行なったものである。この第11図から、一般に、積荷開始時から、同一時間経過した時刻でのひずみ速度を比較した場合、周圧が大きいほど、ひずみ速度もまた大きいといえる。

7. 結 論

本報では、一軸圧縮荷重下および 50, 104, 208 kg/cm² の周圧下での三城目安山岩試験片のクリープ変形挙動について述べた。試験片へのクリープ応力は、各周圧下において 1×10^{-6} /sec. のひずみ速度で載荷したときの平均破壊



第10図 周圧 50 kg/cm² でのひずみ速度曲線 (パラメータは応力レベルとした)



第11図 応力レベル 90% S_n におけるひずみ速度曲線 (パラメータは周圧とした)

強度 S_n のほぼ80, 85, 90, 100%とした。その結果、以下の知見を得た。

(1) 一軸圧縮荷重下および周圧下において、クリープ実験中に破壊の起きた試験片のクリープ挙動は、載荷直後から、時間の経過とともにひずみ速度が減少する区間(減速クリープ区間)と、ひずみ速度が増加する区間(加速クリープ区間)とに分けることができる。特に、前者の減速クリープ区間ではクリープ挙動は対数クリープ則に従う。

(2) 減速クリープ区間と加速クリープ区間の間には、ひずみ速度が最小となる時刻 t_c があり、一軸圧縮荷重下では、試験片の寿命 t_f との間に、

$$t_f \cong 2 t_c$$

なる関係が見出された。

(3) 本実験の行なわれた周圧の範囲内では、周圧を一定として、応力を変えてクリープ実験を行なった場合、載荷直後から同一時間経過後のひずみ速度を比較すると、減速クリープ区間では、クリープ応力が高いほど、ひずみ速度が大きい。

(4) クリープ応力を各周圧下における破壊強度 S_n の90%とした場合、周圧が高いほど、減速クリープ区間でのひずみ速度が大きい。

謝辞 東京大学工学部資源開発工学科・秋山政雄助手は、試験片の作成に、また中国地質科学院地質力学研究所・劉文斌講師は試験結果の整理に貴重な協力を惜しまれなかつた。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 山口 勉・大久保誠介・西松裕一・小泉昇三：日本鉱業会誌，99，87～92，(1983)
- 2) Baar, C.A. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, 251～254, (1973)
- 3) 平松良雄・西原正夫：日本鉱業会誌，73，493～497，(1957)

- 4) Singh, D.P. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 12, 271～276, (1975)
- 5) Höfer, K.H., Knoll, P. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 8, 61～73, (1971)
- 6) Kranz, R.L., Scholz, C.H. : J. Geophys. Res., 82, 4893～4898, (1977)
- 7) Crnden, D.M. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 11, 67～73, (1974)
- 8) Cogan, J. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 13, 1～10, (1976)
- 9) 小林良二・奥村清彦：日本鉱業会春季大会講演要旨集，101～102，(1980)

The Creep Behavior of Sanjome Andesite under Confining Pressure

— The time-dependent mechanical behavior of rock (2nd Report) —

by Tsutomu YAMAGUCHI¹, Seisuke OKUBO², Yuichi NISHIMATSU³ and Shozo KOIZUMI⁴

The compressive creep of Sanjome andesite was examined under the confining pressure from 0 to 400 kg/cm².

The results are as follows:

- (1) The creep behavior of the specimen can be divided into two stages. During the first period starting immediately after loading, creep rate is continuously decreasing with time and the logarithmic creep law fits for most part of this period. In the successive stage, creep rate is increasing monotonously toward the failure.
- (2) The characteristic time, t_c , at which creep rate takes its minimum is found to be related to the lifetime of the specimen, t_f , by the following equation,

$$t_f \cong 2 t_c.$$

In other word, the period of the first stage is nearly equal to that of the second.
- (3) Comparing at the same elapsed time, creep rate increases with creep stress level under a given confining pressure, and increases with confining pressure under a given stress level.

- | | |
|---|---|
| (1. Dr., National Research Institute for Pollution & Resources, MITI.
The University of Tokyo. | 2. Assoc. Prof., Dr., Faculty of Engg.,
The University of Tokyo. |
| 4. Assistant, Faculty of Engg., The University of Tokyo. | 3. Prof., Dr., Faculty of Engg., The University of Tokyo. |

(海洋開発：p.8よりつづく)

コミュニティ・ポリス構想検討委員会」を設置して、上記Aの事項について調査研究を行なう。

(2) 委員会は、必要に応じ立地候補地点の現地調査、ヒアリング調査、文献調査等を行ないつつ、総合的に検討・評価し、「マリン・コミュニティ・ポリス」の基本

概念の確立を図るとともに、同ポリス建設のフィジビリティを明らかにする。

(3) 事務局は、委員会をコーディネートし、意見を聴しつつ、研究の実施、報告書の作成を行なう。

この構想を模式的に描くと、第1図に示したように、沖合に人工島を造り、その周囲の海上にホテル、文化センター、水中劇

場、水族館などを建設してそれぞれを海中トンネルで結ぶ。人工島や付近の海岸にはヨットハーバー、フィッシングパークなども作るといったものとなる。総工費1兆円程度になるという。21世紀の海洋産業の起爆剤としたい考えのようである。

なお、第1表に示したような構想検討委員会のメンバー(案)が考えられている。

第1表 マリン・コミュニティ・ポリス構想検討委員会(仮称)名簿(案)

委員長	竹内 宏	日本長期信用銀行常務取締役	委 員	中山 隆夫	(財)日本情報処理開発協会常務理事
委 員	伊藤 滋	東京大学工学部都市工学科教授		田村 忠義	(社)日本プロジェクト産業協議会常務理事
	石井 威望	東京大学工学部機械工学科教授		大関 哲英	茨城県観光物産課長
	松井 好	立教大学社会学部観光学科教授		村田富士雄	千葉県商政観光課長
	岩下 光男	東海大学海洋学部教授		長田嶺玖郎	東京都観光リクリエーション課長
	今野 修平	福井医科大学教授		河西 三郎	神奈川県企画部計画室長
	西沢 成宜	(財)日本緑化センター常務理事		今西 重雄	静岡県観光貿易課長
	楠田枝里子	童話作家		河本 博隆	資源エネルギー庁海洋開発室長
	菊竹 清訓	建 築 家			
	原 重一	(財)日本交通公社観光計画室長			

(順不同、敬称略)